

УДК 625.1.032.3

В. В. Косарчук, д.т.н., професор (завідувач кафедри «Теоретична та прикладна механіка», Державний університет інфраструктури та технологій)
О. В. Агарков, к.т.н., доцент (доцент кафедри «Теоретична та прикладна механіка», Державний університет інфраструктури та технологій)
В. М. Твердомед, к.т.н., доцент (доцент кафедри «Залізнична колія та колійне господарство», Державний університет інфраструктури та технологій)

ВПЛИВ УХИЛУ РЕЙКИ НА ХАРАКТЕР КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ТА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН РЕЙОК ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

Проаналізовано результати статистичного аналізу дефектності рейок на коліях Київського метрополітену. За допомогою методу скінченних елементів виконано моделювання взаємодії рейок з колесами рухомого складу в залізничній колії. Дана оцінка впливу ухилу рейки на її напружено-деформований стан. На основі проведених розрахунків зроблено висновки щодо найбільш прийняттого ухилу рейки залежно від її типу.

Ключові слова: рейка, колесо, контактні напруження, метод скінченних елементів.

Вступ та аналіз останніх досліджень. Подовження строків експлуатації елементів залізничної колії та рухомого складу є однією з найбільш актуальних задач сьогодення. Дослідження, які були проведені на коліях Київського метрополітену, свідчать, що кількість дефектів контактної-втомного походження, поява яких призводить до зменшення строків експлуатації рейок залізничної колії, має тенденцію до зростання (рис. 1 – 3).

Як видно із діаграм на рис. 1 – 3, кількість таких дефектів як *11* (викришування на поверхні кочення або на робочій викружці головки рейки) та *17* (викришування і відшарування металу в стику) демонструє зростаючу динаміку. Для зменшення їх кількості необхідно з'ясувати причини їх появи та визначити можливі заходи щодо збільшення нормативного ресурсу рейок. Для цього необхідно провести теоретичні, а на їх основі і лабораторні та експлуатаційні дослідження. Серед заходів що дозволяють подовжити строки

© Косарчук В. В., Агарков О. В., Твердомед В.М., 2018

служби рейок залізничної колії та зменшити дефектність можна запропонувати такі, як підвищення міцності та зносостійкості пари колесо-рейка [1-2] або оптимізація контактної пари колесо-рейка.

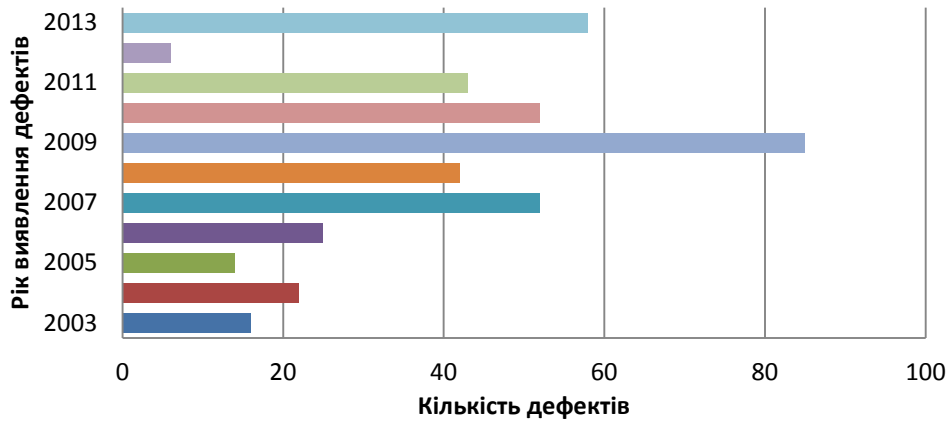


Рис. 1. Розподіл кількості виявлених дефектів за кодом 11 по роках

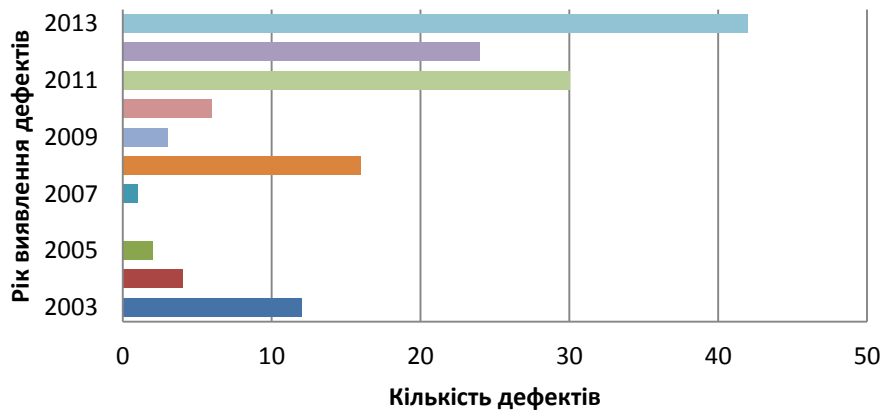


Рис. 2. Розподіл кількості виявлених дефектів за кодом 17.1-2 по роках

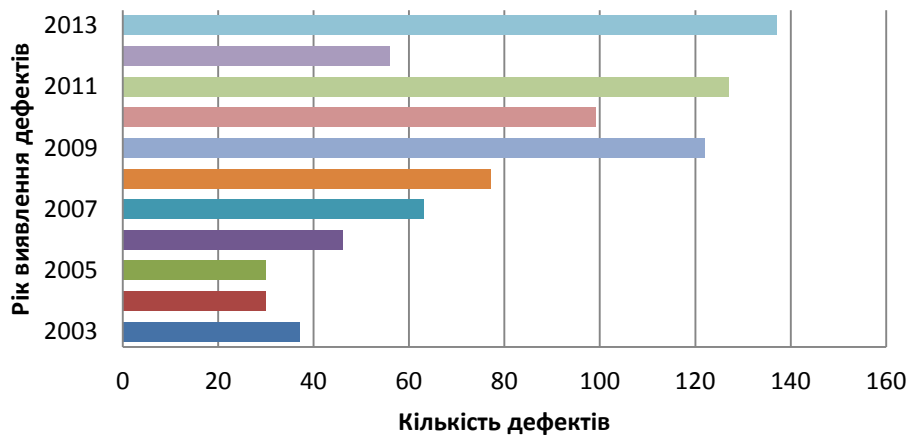


Рис. 3. Розподіл загальної кількості виявлених дефектів по роках

Постановка проблеми. Незважаючи на численні дослідження питань взаємодії в системі колесо-рейка [3-8] та намагань оптимізації вказаної контактної пари, багато питань залишається невизначеними. Це в першу чергу пов'язано із значною кількістю факторів, у тому числі і випадкового характеру, які на сьогоднішній день неможливо врахувати. Зокрема, якщо розглядати залізничну колію, то існує багато різноманітних порушень геометрії залізничної колії, які з'являються в процесі експлуатації та мають значною мірою випадковий характер.

Так, наприклад, такий параметр, як ухил рейки залізничної колії може змінюватись залежно від типу шпал, їх стану, типу рейкових підкладок та їх технічного стану, рейкових скріплень та їх стану тощо.

Мета і завдання дослідження. В статті розглядаються результати чисельного моделювання взаємодії колеса рухомого складу та рейок залізничної колії при зміні таких параметрів, як тип рейки та ухил рейки залізничної колії.

Матеріали та методи дослідження. Оскільки колесо і рейка мають досить складну форму поверхні, то для моделювання їх взаємодії використовували метод скінченних елементів. Цей метод на сьогоднішній день достатньо широко використовується у світі при проведенні комп'ютерного моделювання контактної взаємодії коліс з рейками [9-11].

При проведенні розрахунків розглядалися рейки трьох типів (P50, P65 і UIC60) і колеса із профілем поверхні кочення відповідно до ГОСТ 9036-88 [21]. Діаметр коліс за кругом кочення дорівнював 780 мм.

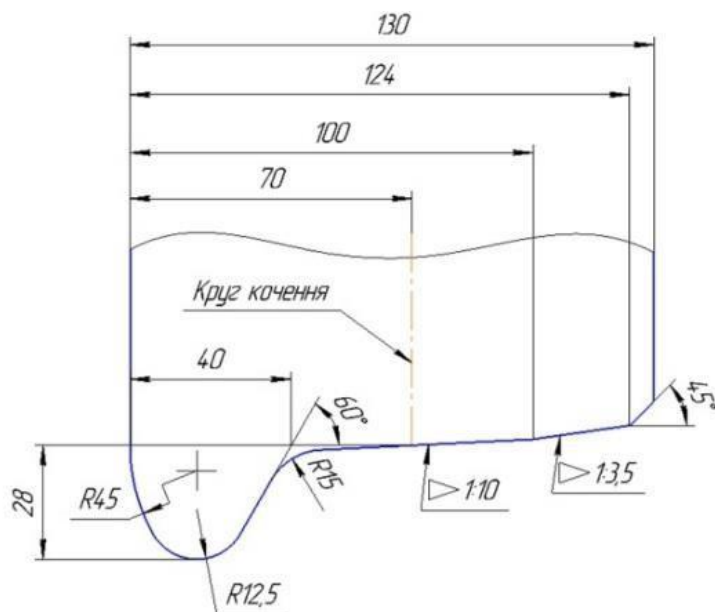


Рис. 4. Профіль бандажу вагонних коліс відповідно до ГОСТ 9036-88

Для визначення напружень і деформацій у зоні контакту рейки з колесом використовували геометричну модель, яка являла собою ділянку рейки довжиною 600 мм (міжшпальна відстань) з шарнірними опорами на торцях, що певною мірою забезпечує урахування впливу величини вертикального прогину рейки на розміри площадки контакту.

Основні механічні характеристики матеріалу рейок: модуль пружності при розтяганні $E=2,1 \cdot 10^5$ МПа; коефіцієнт Пуассона $\nu=0,3$; Механічну поведінку матеріалу колеса вважали пружною з параметрами пружності: модуль пружності при розтяганні $E=2,1 \cdot 10^5$ МПа; коефіцієнт Пуассона $\nu=0,3$.

Геометрія поверхні рейок відповідала типам рейок Р50, Р65 та UIC60, ухили рейок приймалися рівними 0, 1:20 та 1:40 на бетонних шпалах з епюрою 1680 шт/км (міжшпальна відстань 60 см). Осьове навантаження на колесо рухомого складу для усіх варіантів розрахунків було однаковим і складало 75 кН, що відповідає навантаженню на вісь, рівному 150 кН. Задачі розв'язувались у пружній постановці.

Проаналізуємо отримані результати.

На діаграмі (рис. 5) зображено значення максимальних тисків на поверхні рейки. Як видно з діаграми, найбільш оптимальним з точки зору мінімізації сил в зоні контакту є варіант використання рейок Р65 та Р50 з ухилом останніх 1:20. При зміні ухилу рейки до значення 1:40, контактний тиск на поверхні рейок типу Р50 і Р65 зростає, при цьому тип рейок UIC60 демонструє сталість тиску для обох варіантів ухилу. Якщо ухил рейки відсутній, то це призводить до значного зростання тиску від колеса на поверхні рейки.

Порівняємо рівні та характер розподілу еквівалентних за Мізесом напружень.

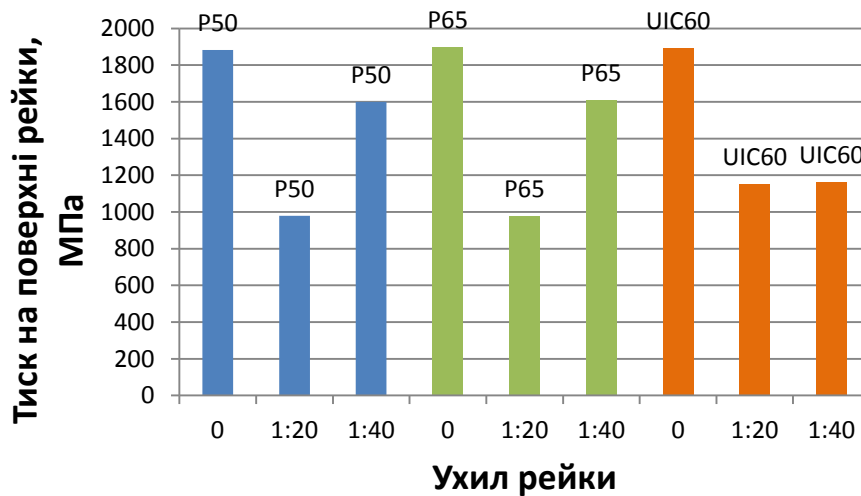


Рис. 5. Залежність між рівнями тиску на поверхні і ухилом рейки при взаємодії рейки із колесом

На рис. 6 зображено рівні та характер розподілу еквівалентних напружень в зоні контакту при ухилі рейки 1:20.

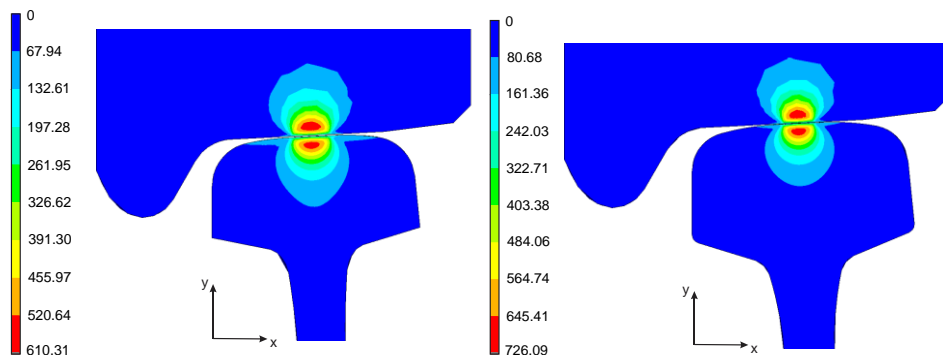


Рис. 6. Розподіл еквівалентних за Мізесом напружень в рейках P50 – ліворуч та UIC 60 – праворуч

Як видно з рисунка, при таких умовах контактної взаємодії площадка контакту розташовується по центру рейки. Максимальні значення еквівалентних напружень складають $\sigma_{eqv} = 610$ МПа для рейки P50 та $\sigma_{eqv} = 726$ МПа для рейки UIC60.

В таблиці 1 наведено вимоги до матеріалу рейок відповідно до ДСТУ 4344:2004.

Таблиця 1

Вимоги до механічних властивостей матеріалу рейок

Категорія рейки	Механічні властивості				
	Тимчасовий опір, σ_b , Н/мм ² (кгс/мм ²)	Границя текучості, $\sigma_{0,2}$, Н/мм ² (кгс/мм ²)	Відносне видовження, δ , %	Відносне звуження, ψ , %	Ударна в'язкість КСУ, Дж/см ² (кгс·м/см ²)
Не менше					
Вища	1290 (131)	850 (87)	10,0	30,0	15 (1,5)
I	1196 (122)	800 (82)	8,0	25,0	25 (2,5)
II	1137 (116)	740 (76)	6,0	25,0	15 (1,5)
III	900 (92)	—	5,0	—	—

Як бачимо, в цьому випадку рівні напружень в рейці не перевищують границю текучості для рейок не нижче II категорії. Тобто в цьому випадку в перерізі рейок не виникає пластичних деформацій. Однак це справедливо лише за умови, що матеріал рейки має суцільну однорідну структуру. Розподіл еквівалентних напружень в рейці типу P65 схожий на P50, оскільки вони мають схожий профіль поверхні.

На рис. 7 зображено рівні та характер розподілу еквівалентних напружень в зоні контакту при ухилі рейки 1:40.

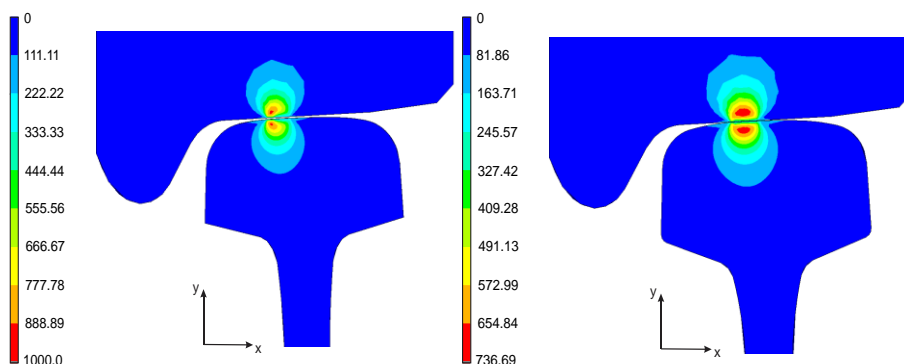


Рис. 7. Розподіл еквівалентних за Мізесом напружень в рейках P50 – ліворуч та UIC 60 – праворуч

Як видно з рисунка, при таких умовах контактної взаємодії місце контакту зміщується на поверхні в сторону внутрішньої грані рейки. Максимальні значення еквівалентних напружень складають $\sigma_{eqv}=1000$ МПа для рейки P50 та $\sigma_{eqv}=737$ МПа для рейки UIC60.

Як видно зміна ухилу призвела до зростання максимальних еквівалентних напружень в рейці P50 на 64%. Такі напруження перевищують границю текучості матеріалу рейки всіх категорій, а отже, такі напруження будуть

викликати пластичну деформацію матеріалу рейки. В рейках типу UIC60 рівень напружень при цьому залишився практично незмінним.

Розподіл еквівалентних напружень в рейці типу Р65 схожий на Р50 із причин, які були описані вище.

На рис. 8 зображено рівні та характер розподілу еквівалентних напружень в зоні контакту при улаштуванні рейок без ухилу.

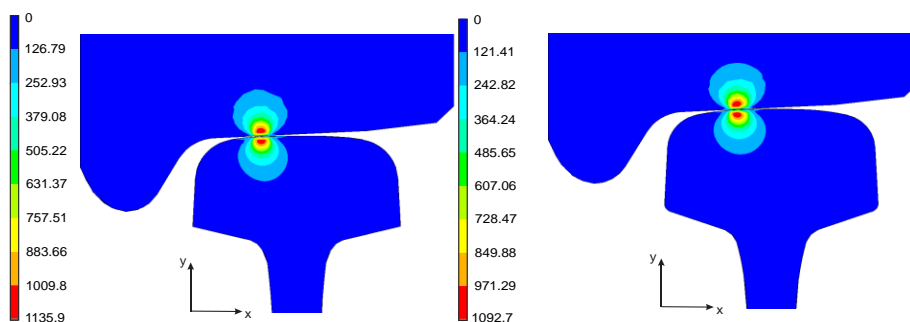


Рис. 8. Розподіл еквівалентних за Мізесом напружень в рейках Р50 – ліворуч та UIC 60 – праворуч

Як видно з рисунка, при таких умовах контактної взаємодії місце контакту зміщується на в сторону внутрішньої грані рейки. Максимальні значення еквівалентних напружень складають $\sigma_{eqv}=1136$ МПа для рейки Р50 та $\sigma_{eqv}=1093$ МПа для рейки UIC60.

Рівні напружень вказують на те, що такий варіант розташування рейки є найгіршим для всіх профілей поверхні кочення рейок, що розглядаються, напруження складають приблизно 1100 МПа, що значно перевищує границю текучості і наближається до границі міцності.

Висновки. Отже результати проведеного математичного моделювання показали, що за умови розташування рейок в прямій ділянці колії та використання рухомого складу із типом коліс, що використовувався при проведенні розрахунків, найбільш оптимальним з точки зору зменшення контактних напружень є профіль рейок Р50 та Р65 при забезпеченні ухилу рейки 1:20. При ухилі рейки 1:40 більш оптимальним є профіль рейки UIC60. Відсутність ухилу рейки призводить до збільшення рівнів сил контактної взаємодії, при цьому рівні еквівалентних напружень майже рівні для усіх профілей головок рейок.

Робити однозначні висновки про оптимальність того або іншого профілю рейки при контакті з колесом на основі результатів проведених досліджень неможливо, оскільки необхідно додатково дослідити як впливає знос кожного із профілей на напружено-деформований стан рейок. Провести такі дослідження та висвітлити їх результати автори планують у наступних своїх публікаціях.

Однак наведені результати дозволяють однозначно вказати на те, що відсутність нормативного ухилу рейки призводить до значного зменшення експлуатаційного ресурсу рейок.

ЛІТЕРАТУРА

1. Косарчук В.В. Сучасні методи зміцнення і підвищення зносостійкості пар тертя / Косарчук В.В., Кульбовський І.І., Агарков О.В. // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ, 2015. – Випуск 31. – 263-268 с.
2. Косарчук В.В. Сучасні методи зміцнення і підвищення зносостійкості пар тертя. Частина 2 / Косарчук В.В., Кульбовський І.І., Агарков О.В. // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ, 2016. – Випуск 1(34). – С. 202-210
3. Salvatore Strano. On the real-time estimation of the wheel-rail contact force by means of a new nonlinear estimator design model / Salvatore Strano, Mario Terzo // *Mechanical Systems and Signal Processing* – 2017 – 105(2018) – P. 391-403.
4. Косарчук В.В. Вплив профілю вагонних коліс на рівень контактних напружень у рейках / Косарчук В.В., Даніленко Е. І., Агарков О. В., Рафальський О. Ю. // 36. наук. праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». – 2018. – 31. – С. 3-18.
5. Агарков О.В. Визначення контактних напружень в рейках залізничної колії за допомогою методу скінченних елементів / Агарков О.В. // 36. наук. праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». – 2014. – 24. – С. 39-44
6. Харрис У. Дж. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса. / Пер. с англ. // У. Дж. Харрис, С.М. Захаров, Дж. Ландгрэн, Х. Турне, В. Эберсен. – М.: Интекст, 2002. – 408 с.
7. Вербицкий В.Г. Приближенное определение автоколебаний бокового отбоя колесной пары в прямых участках железнодорожного пути. / В.Г. Вербицкий В.Г., В.Н. Молчанов, И.И. Кульбовский, В.Н. Твердомед // Управление проектами, системный анализ и логистика. – Вып. 11. – К.: НТУ – 2013.
8. Бойко В.Д. Розрахунок поперечних горизонтальних сил у кривих ділянках рейкової колії / Бойко В.Д., Твердомед В.М., Возненко А.Д. // 36. наук. праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». – Вип. 29, 2016.
9. Yuewei Maa. Modelling verification and influence of operational patterns on tribological behaviour of wheel-rail interaction / Yuewei Maa, Valeri Markinea, Abdul Ahad Mashala, Mingfa Renb // *Tribology International*. – 2017. – 114. – P. 264 – 281
10. H.M.El-sayed. Prediction of fatigue crack initiation life in railheads using finite element analysis / H.M.El-sayed, M.Lotfy, H.N.El-din Zohny, H.S.Riad // *Ain Shams Engineering Journal*. – 2017. – P. 1 – 14
11. Reza Masoudi Nejad. Effect of wear on rolling contact fatigue crack growth in rails / Reza Masoudi Nejad, Mahmoud Shariati, Khalil Farhangdoost // *Tribology International*. – 2015. – 94. – P. 118 – 125
12. ГОСТ 9036-88. Колеса цельнокатаные. Конструкция и размеры. – М.: Изд-во стандартов, 1989.– 15 с.

REFERENCES

1. Kosarchuk V.V., Kulbovskiy I.I., Aharkov O.V. (2015) Suchasni metody zmitsnennia i pidvyshchennia znosostiikosti par tertia [Modern methods strengthen and improve the wear resistance of friction pairs] Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu. Vypusk 31. – 263-268 s. (In Ukrainian)
2. Kosarchuk V.V., Kulbovskiy I.I., Aharkov O.V.(2016) Suchasni metody zmitsnennia i pidvyshchennia znosostiikosti par tertia. Chastyna 2 [Modern methods strengthen and improve the wear resistance of friction pairs. Part 2]. Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu. Vypusk 1(34). – S. 202-210 (In Ukrainian)
3. Strano, S., & Terzo, M. (2018). On the real-time estimation of the wheel-rail contact force by means of a new nonlinear estimator design model. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 105, 391–403. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.12.024>
4. Kosarchuk V.V. , Danilenko E. I., Aharkov O. V., Rafalskyi O. Yu. (2018) Vplyv profilu vahonnykh kolis na riven kontaknykh napruzhen u reikakh [The influence of the profile of carriage wheels on the level of contact stresses in rails]. Zb. nauk. prats DUIT. Serii «Transportni systemy i tekhnolohii». 31. S.3-18.
5. Aharkov O.V. (2014) Vyznachennia kontaknykh napruzhen v reikakh zaliznychnoi kolii za dopomohoiu metodu skinchennykh elementiv [Determination of contact stresses in the railway rails using finite elements method] Zb. nauk. prats DETUT. Serii «Transportni systemy i tekhnolohii». 24. S. 39-44
6. W.J. Harris, S.M. Zakharov, J. Landaren, H. Thorne, V. Ebersen, J. Harris.(2002) Obobshchenieпередового опыта tyazhelovesnogo dvizheniya: voprosyi vzaimodeystviya kolesa i relsa [Generalization of the advanced experience of heavy traffic: questions of wheel and rail interaction]. Intekst. – 408 s.
7. Verbickii V.G., Molchanov V.M., Kulbovskiy I.I., Tverdomed V.M.. Priblizhennoe opredelenie

avtokolebaniy bokovogo otnosa kolesnoy paryi v pryamyih uchastkah zheleznodorozhnogo puti. [Approximate determination of the self-oscillation of the wheelset lateral refers to straight sections of railway track]. V.G. Verbitskiy V.G., V.N. Molchanov, I.I. Kulbovskiy, V.N. Tverdomed // Upravlenie proektami, sistemnyiy analiz i logistika. – K.: NTU – 2013. Vyip. 11.

8. *Boiko V.D.*, Tverdomed V.M., Voznenko A.D.(2016). Rozrakhunok poperechnykh horyzontalnykh syl u kryvykh dilyankakh reikovoï kolii [Calculation of transverse horizontal forces in curved sections of rail track] Zb. nauk. prats DETUT. Seriiia «Transportni systemy i tekhnolohii». Vyip. 29.

9. *Ma, Y., Markine, V., Mashal, A. A., & Ren, M.* (2017). Modelling verification and influence of operational patterns on tribological behaviour of wheel-rail interaction. *Tribology International*, 114, 264–281. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.04.038>

10. El-sayed, H. M., Lotfy, M., El-din Zohny, H. N., & Riad, H. S. (2017). Prediction of fatigue crack initiation life in railheads using finite element analysis. *Ain Shams Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.06.003>

11. Masoudi Nejad, R., Shariati, M., & Farhangdoost, K. (2016). Effect of wear on rolling contact fatigue crack growth in rails. *Tribology International*, 94, 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.08.035>

12. GOST 9036-88. Kolesa tselnokatanyie. Konstruktsiya i razmeryi [Solid wheels. Design and dimensions]. Izd-vo standartov, 1989. 15 s.

V. V. Косарчук, д.т.н., профессор
(заведуючий кафедри «Теоретическая и прикладная механика»,
Государственный университет инфраструктуры и технологий);

A. В. Азарков, к.т.н., доцент
(доцент кафедри «Теоретическая и прикладная механика»,
Государственный университет инфраструктуры и технологий);

В. Н. Твердомед, к.т.н., доцент
(доцент кафедри «Железнодорожный путь и путевое хозяйство»,
Государственный университет инфраструктуры и технологий)

ВЛИЯНИЕ УКЛОНА РЕЛЬС НА ХАРАКТЕР КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ

СОСТОЯНИЕ РЕЛЬС ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Проанализированы результаты статистического анализа дефектности рельсов в пути Киевского метрополитена. С помощью метода конечных элементов выполнено моделирование взаимодействия рельсов с колесами подвижного состава в железнодорожном пути. Дана оценка влияния уклона рельса на его напряженно-деформированное состояние. На основе проведенных расчетов сделаны выводы относительно наиболее приемлемого уклона рельса в зависимости от его типа.

Ключевые слова: *рельс, колесо, контактные напряжения, метод конечных*

*Kosarchuk Valerii, Doctor of Technical Sciences, Professor
(Head of Department of theoretical and applied mechanics, State
University of Infrastructure and Technology)*

*Aharkov Oleksandr, Ph. D., associate professor
(Associate professor of Department of theoretical and applied mechanics,
State University of Infrastructure and Technology)*

*Tverdomek Volodymyr, Ph. D., associate professor
(Associate professor of Department of railway track and track facilities,
State University of Infrastructure and Technology)*

INFLUENCE OF THE RAIL SLOPE ON THE NATURE OF THE CONTACT INTERACTION AND THE STRESS-DEFORMED CONDITION OF THE RAIL IN RAIL TRACK

Studies carried out on the roads of the Kiev Metro have shown that the number of defects of contact-fatigue origin, the appearance of which leads to a reduction in the length of operation of railways rails, tends to increase. Despite numerous research of the wheel-rail interaction [3-8] and efforts to optimize the specified contact pair, many issues remain uncertain. Using the finite element method, authors simulated the interaction of rails with wheels of rolling stock in a railway track.

The geometry of the surface of the rails corresponded to the types of rails P50, P65 and UIC60, the slopes of the rails were taken equal to 0, 1:20 and 1:40 on concrete sleepers with a diagram of 1680 pc/km (inter-span distance 60 cm). The axle load on the rolling stock wheel for all variants of the calculations was the same and was 75 kN, which corresponds to the load on the axle equal to 150 kN. The tasks were solved in an elastic setting.

The results of the conducted mathematical modeling showed that with the location of the rails in the straight section of the track and the use of rolling stock with the type of wheels used in the calculations, the profile of the rails P50 and P65 is the most optimal in terms of reducing the contact stresses with a 1:20 slip. When slipping 1:40 rails, the profile of the UIC60 rail is more optimal. The absence of a slope of the rail leads to an increase in the levels of contact interaction forces, with the level of equivalent stress almost equal for all profiles of rail in track.

Keywords: rail, wheel, contact stresses, finite element method.